



УДК 631.372:502.4



DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-1-48-56

Снижение выбросов оксидов при управлении процессом сгорания в дизельном двигателе

Валерий Леонидович Чумаков,
кандидат технических наук, профессор,
e-mail: valery.chumakov@gmail.com;

Сергей Николаевич Девянин,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: devta@rambler.ru

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А.Тимирязева, Москва, Российская Федерация

Реферат. Показали, что нормы Европейского союза на токсичность отработанных газов (Евро 1 – Евро 5) способствовали снижению выбросов основных вредных компонентов в несколько раз. В зарубежных странах на тракторную технику распространяются нормы *Stage* и *Tier*, которые также на законодательном уровне ограничивают содержание токсичных компонентов. (*Цель исследования*) Снизить содержание оксидов азота в отработанных газах посредством более эффективного регулирования распределения топливного заряда в цилиндре газодизельного двигателя, изменения в отдельных зонах концентрации дизельного и газового топлива, а также использования рециркуляции отработанных газов. (*Материалы и методы*) Проанализировали результаты моделирования образования оксидов азота посредством управления рабочим процессом в газодизельной модификации дизельного двигателя. В расчетах применяли геометрические параметры двигателя Д-120, работающего в режиме 2000 оборотов в минуту, при наполнении 0,6-0,9 объема, средний по заряду коэффициент избытка воздуха равен 1,2-3,0, а коэффициенты избытка воздуха по газозооной смеси не превышают 1,2-2,5. (*Результаты и обсуждение*) С помощью расчетной модели оценили параметры при различном давлении на впуске двигателя в пределах 0,05-0,09 мегапаскаля, а также при увеличении коэффициента остаточных газов в диапазоне 5-15 процентов с уменьшением концентрации оксидов азота с 2500 до 1100 частиц на миллион соответственно. Экспериментальным путем показали, что при изменении мощности от 100 до 20 процентов концентрация оксидов азота снижается с 1940 до 800 частиц на миллион. (*Выводы*) Подтвердили адекватность работы расчетной модели. Определили, что уменьшение концентрации окиси азота в отработанных газах на 40-50 процентов достигается при различных схемах расслоения заряда в камере сгорания. Выявили, что обеспечение норм по угарному газу, углеводородам и оксидам азота потребует смешанного регулирования двигателя. Доказали, что рециркуляция 15 процентов отработанных газов позволяет снизить выброс оксидов азота еще на 50 процентов.

Ключевые слова: отработанные газы, токсичность выбросов, газодизельная модификация дизельного двигателя, управление процессом сгорания, расчетная модель, Евро 6.

■ **Для цитирования:** Чумаков В.Л., Девянин С.Н. Снижение выбросов оксидов при управлении процессом сгорания в дизельном двигателе // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. №1. С. 48-56. DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-1-48-56.

Oxide Emissions Reduction from Combustion Control in a Diesel Engine

Valery L. Chumakov,
Ph.D.(Eng.), professor,
e-mail: valery.chumakov@gmail.com;

Sergey N. Devyanin,
Dr.Sc.(Eng.), professor,
e-mail: devta@rambler.ru

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

Abstract. The authors showed that the European Union norms for the toxicity of exhaust gases (Euro 1 – Euro 5) contributed to the reduction of main harmful components emissions by several times. In foreign countries, Stage and Tier regulations applied to tractor equipment, which also limited the content of toxic components at the legislative level. (*Research purpose*) To reduce the content of nitrogen oxides in exhaust gases by more efficient regulation of the fuel charge distribution in the gas-diesel engine cylinder, changes in the concentration of diesel and gas fuel in certain zones, as well as the use of exhaust gas recirculation. (*Materials and methods*) The authors analyzed the results of modeling the formation of nitrogen oxides by controlling the workflow in the gas-diesel modification of the diesel engine. In the calculations, the geometric parameters of the D-120 engine, operating at



2000 revolutions per minute, with a filling of 0.6-0.9 volume, were used. The average excess air ratio for the charge was 1.2-3.0, and the excess air ratios for the gas-air mixtures did not exceed 1.2-2.5. (*Results and discussion*) Using the computational model, the authors estimated the parameters at different pressures at the engine inlet within 0.05-0.09 megapascals, as well as with an increase in the residual gas coefficient in the range of 5-15 percent with a decrease in the concentration of nitrogen oxides from 2500 to 1100 parts per million. Experiments showed that when the power changed from 100 to 20 percent, the nitrogen oxides concentration decreased from 1940 to 800 parts per million. (*Conclusions*) The authors confirmed the adequacy of the calculation model. They determined that a 40-50 percent reduction in the nitrogen oxide concentration in exhaust gases was achieved with various layering schemes in the combustion chamber. They found that the standards for carbon monoxide, hydrocarbons and nitrogen oxides would require mixed engine regulation. It was proved that recirculation of 15 percent of exhaust gases could reduce nitrogen oxide emissions by another 50 percent.

Keywords: exhaust gases, emission toxicity, gas-diesel modification of a diesel engine, combustion control, design model, Euro 6.

For citation: Chumakov V.L., Devyanin S.N. Snizhenie vybrosov oksidov pri upravlenii protsessom sgoraniya v dizel'nom dvigatele [Oxide emissions reduction from combustion control in a diesel engine]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2021. Vol. 15. N1. 48-56 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-1-48-56.

Тракторная техника занимает большую долю от общего объема мобильных машин и обеспечивает наибольший спектр сельскохозяйственных работ. Развитие тракторных двигателей внутреннего сгорания требует повышенного внимания к улучшению их экологических характеристик. Основные токсичные компоненты, такие как сажа (С), монооксид углерода (СО), углеводороды (C_nH_m) и оксиды азота (NO_x), негативно влияют на окружающую среду и организмы, снижая темпы производства сельхозпродукции [1].

Нормы Европейского союза на токсичность отработанных газов (ОГ) за 1993-2009 (Евро 1 – Евро 5) способствовали снижению выбросов основных вредных компонентов в несколько раз. В зарубежных странах на тракторную технику распространяются нормы *Stage* и *Tier*, которые также на законодательном уровне ограничивают содержание токсичных компонентов в ОГ [2]. Переход к рекомендациям Евро 6 сопряжен с дальнейшим снижением токсичности дизелей по сравнению с Евро 5. Например, выброс NO_x должен быть сокращен на 26-56% для легковых и коммерческих автомобилей (0,180 до 0,080 и с 0,280 до 0,125 г/кВт·ч соответственно), а для тяжелых дизелей – в 5 раз (с 2,0 до 0,4 г/кВт·ч) [3, 4]. Снижению подлежат и выбросы углеводородов C_nH_m . Решение этой задачи возможно при значительном ограничении использования дизелей и замене другими двигателями.

Оксиды азота NO_x образуются при наличии необходимых концентраций кислорода, азота и высоких температур [5-7]. Аналогичные процессы происходят и при использовании других типов топлива, так как физико-химические свойства горения имеют схожий характер [8, 9]. Исследования образования оксидов азота в камере сгорания поршневого двигателя показывают, что в условиях неравномерного поля температур и концентраций топлива в отдельных зонах выброс NO_x с ОГ можно сократить, если снизить концентрацию кислорода в зонах горения с высокой тем-

пературой или уменьшить температуру в зонах с повышенной концентрацией кислорода. Существование аналогичных моделей, построенных на принципах расчета параметров заряда послойно, указывает на актуальность данного подхода к оценке содержания оксидов азота [10, 11].

При экспериментальной доводке двигателя на рабочий процесс воздействуют комплексно. Зачастую сложно выделить степень влияния на образование NO_x тех или иных факторов: особенностей внутреннего смесеобразования, распределения топлива и остаточных газов по зонам камеры сгорания, использования двухтопливных смесей, возможной рециркуляции ОГ, динамики тепловыделения и других.

Цель исследования – снизить содержание оксидов азота NO_x в ОГ посредством более эффективного регулирования распределения топливного заряда в цилиндре газодизельного двигателя, изменения в отдельных зонах концентрации дизельного и газового топлива, а также использования рециркуляции ОГ.

В ходе достижения цели решаются следующие задачи:

- анализ оптимальных условий для снижения содержания оксидов азота в ОГ посредством моделирования;
- оценка параметров образования NO_x при влиянии факторов нагрузки, рециркуляции ОГ и различных условиях смесеобразования заряда;
- проведение экспериментального исследования на двигателе с газодизельной системой питания с целью корреляции результатов моделирования.

Материалы и методы. Провели расчеты с целью исследования возможностей снижения выбросов NO_x для газодизельной модификации двигателя, работающего на дизельном топливе, подаваемом через форсунку в цилиндр двигателя, и пропан-бутановой смеси сжиженного газа, подаваемой во впускной трубопровод.

Использовали модель рабочего цикла Максимо-

ва А.Л., адаптированную для расчета с расслоенным зарядом [12, 13]. Расчет рабочего цикла двигателя предполагает разделение рабочего заряда в камере сгорания на 10 равных по массе зон, выгорающих последовательно. По мере выгорания заряда в зоне исходный состав мгновенно заменяется на продукты сгорания. По каждой порции последовательно рассчитывают равновесный состав продуктов сгорания: CO , CO_2 , H_2O , H_2 , H , OH , O , O_2 , N_2 . Полагается, что образование оксидов азота идет по расширенному механизму Зельдовича Я.Б. Допускается, что основной компонент оксидов азота в ОГ – выброс окиси азота NO . Для моделирования закона выгорания топлива можно применить экспериментально полученную кривую тепловыделения в двигателе, работающем на дизельном топливе [5].

Расчетная модель рабочего цикла с учетом неравномерного распределения топлива в заряде обеспечивает адекватные результаты при исследованиях работы двигателей, работающих на двух видах топлива [13]. Неравномерное распределение топлива по 10 зонам заряда определяется долей цикловой подачи топлива, остаточных газов; учитывается возможность изменения плотности воздуха в цилиндре с помощью дросселирования заряда на впуске.

В расчетах заданы геометрические параметры двигателя Д-120, работающего в режиме $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, при наполнении $\eta_v = 0,6-0,9$, средний по заряду коэффициенту избытка воздуха равен $\alpha_2 = 1,2-3,0$, а коэффициенты избытка воздуха по газозооной смеси не превышают $\alpha_{\text{газ}} = 1,2-2,5$. Для расчетных режимов допускалось использование соответствующих кривых тепловыделения базового дизеля.

Пример моделирования динамики изменения температур и концентраций NO по 10 последовательно выгорающим зонам топливовоздушного заряда с равномерным распределением топлива и допущением точечного воспламенения смеси в первой зоне показан в функции угла поворота коленчатого вала (рис. 1). Результаты отражают типичное представление о наибольших локальных температурах сгорания в первых порциях заряда. Соответственно, для принятых по допущению гомогенных бедных смесей ($\alpha = 1,2$) наибольшая интенсивность образования NO отмечается в первой выгорающей порции заряда. Общий выброс NO определяется количеством окиси азота, образующейся в первых пяти порциях заряда 1-5. В порциях 6-10 образуется существенно меньше окиси азота ввиду более низких температур горения. Итоговые «замороженные» концентрации окиси азота на линии расширения цикла составили 5130 ppm.

Несколько повышенные для дизеля выбросы NO можно объяснить принятыми исходными данными: достаточно высокой для дизеля концентрацией топлива и гомогенного заряда $\alpha = 1,2-1,3$ и незначительной длительностью тепловыделения (поворот колен-

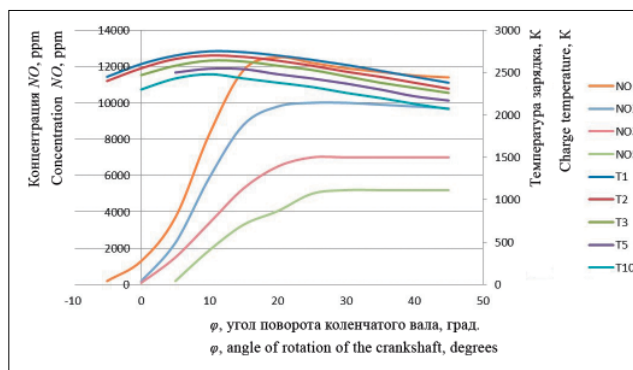


Рис. 1. Динамика температур и окиси азота по зонам заряда при равномерном распределении топлива в зависимости от угла поворота коленчатого вала

Fig. 1. Temperatures and nitrogen oxide dynamics in the charge zones with uniform fuel distribution depending on the angle of rotation of the crankshaft

чатого вала 30°). Рост выбросов оксидов азота зависит от температуры и концентрации компонентов – азота и кислорода. При $\alpha = 1,2-1,3$ температуры сгорания максимальны. Под сокращением длительности тепловыделения подразумевается более интенсивная динамика выделения теплоты и повышения температур сгорания. Оба фактора работают на рост образования оксидов азота.

Проанализировали условия образования NO для различных схем расслоения: от равномерного распределения топлива по зонам до линейного изменения концентрации топлива от богатой смеси в первой зоне и (постепенного или ступенчатого) обеднения к последней сгорающей зоне.

В общем случае моделирования схемы расслоения заряда можно условно выделить три области:

- первоначально сгорающие порции с обогащенным составом смеси, например $\alpha = 0,87$ при массе 10-30% от общей массы заряда;
- переходная зона с линейным обеднением смеси от порции к порции при массе 0-90% общей массы заряда;
- обедненные порции заряда, сгорающие в последнюю очередь.

Например, схема 1-0 подразумевает 10%-ную обогащенную первую порцию заряда и остальные 9 зон (90%) обедненной смеси с равномерным распределением топлива. А схема 1-3 предполагает первую богатую порцию заряда, затем 3 порции с «последовательным линейным» обеднением от второй к четвертой порции и затем 6 порций однородной обедненной смеси.

Расчеты указывают, что при работе газодизеля на средних по заряду обедненных смесях выше $\alpha > 1,2$ реализация любого варианта расслоения позволяет снизить концентрацию окиси азота в ОГ. Например, можно представить температуры горения и динамику образования NO по порциям заряда для схемы 1-3, по-



звolyающей снизить выброс NO в 2 раза по сравнению с гомогенным зарядом (рис. 2). Снижение суммарного выброса NO с ОГ – следствие уменьшения интенсивности образования окиси азота практически во всех порциях заряда, кроме третьей. Наиболее резкое сокращение прослеживается в начальной обогащенной порции ($\alpha_1 = 0,87$), что связано не только с недостатком свободного кислорода, но и с заметным разложением окиси азота вследствие достаточного времени протекания обратимых реакций между атомарным азотом и кислородом на линии расширения в условиях высоких температур в порции. Сходная картина наблюдается и во второй порции ($\alpha_2 = 0,99$). Наиболее существенный вклад в итоговую концентрацию NO вносит третья порция заряда. Бедный состав смеси ($\alpha = 1,1$) и достаточно высокие температуры сгорания приводят к интенсивному образованию NO в ходе сгорания, а быстрое понижение температуры на линии расширения вызывает последующее «замораживание» достигнутых концентраций. Сгорание последующих обедненных порций заряда ($\alpha = 1,36$) вследствие низких температур сопровождается незначительным образованием окиси азота.

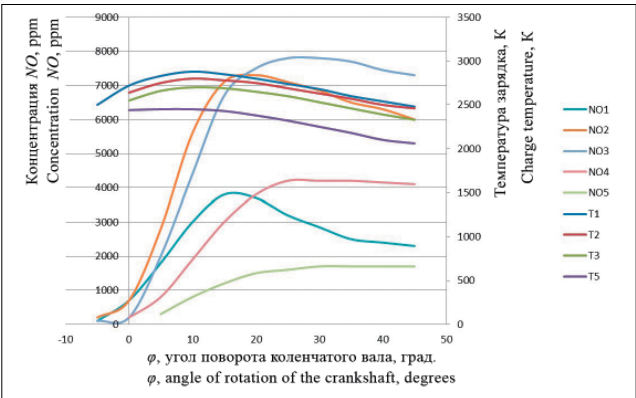


Рис. 2. Динамика температур и концентрации окиси азота по первым пяти зонам заряда при неравномерном распределении топлива (схема 1-3)

Fig. 2. Temperatures and nitrogen oxide concentration dynamics in the first five charge zones with uneven fuel distribution (scheme 1-3)

«Зоны» – условные порции заряда (10% каждая), на которые по условиям принятой расчетной модели рабочего цикла Максимова А.Л. делится весь заряд [12]. Они последовательно выгорают одна за другой. Понятие «зоны» – не геометрическое, а физическое разделение заряда на порции, выгорающие последовательно в соответствии с принимаемым законом тепловыделения. Именно первые пять зон характеризуют интенсивное образование окиси азота. Причем рост окиси азота сочетается с ее разложением после экстремальных значений вследствие обратимых реакций, характерных для образования оксидов азота. Этот механизм Зельдовича Я.Б. стал классикой теории горе-

ния топлив и образования соединений азота [5]:

1. $N_2 + O \leftrightarrow NO + N$
2. $O_2 + N \leftrightarrow NO + O$
3. $N + O \leftrightarrow NO$
4. $N + OH \leftrightarrow NO + H$
5. $N_2 + O_2 \leftrightarrow 2NO$

Порции 3-5 интересны тем, что имеют все условия для интенсивного образования азота: концентрации атомарных азота и кислорода и достаточно высокие температуры. Специфика этих порций в том, что они начинают свое горение позже, чем порции 1 и 2, и у них, с учетом понижения температур сгорания на линии расширения, соответственно, остается меньше времени на завершение обратимых процессов возврата образовавшихся соединений разных форм оксидов азота к исходным компонентам N и O . После диссоциации молекул азота и кислорода на атомы, образования оксидов азота, температура в рабочем цикле в ходе процесса расширения снижается, и наступает так называемое «замораживание образовавшихся концентраций различных форм оксидов азота».

Зоны 6-10 не представляют интереса. По Зельдовичу Я.Б., интенсивность образования оксидов азота снижается при температурах меньше 1850 К. В соответствии с более поздним вступлением в реакции общая температура в порциях 6-10 снижается настолько, что даже имеющиеся в избытке концентрации кислорода и азота не дают существенного образования оксидов азота.

Таблица 1		Table 1			
ВЛИЯНИЕ СХЕМЫ РАССЛОЕНИЯ НА ВЫБРОС ОКИСИ АЗОТА С ОТРАБОТАННЫМИ ГАЗАМИ, PPM					
INFLUENCE OF THE LAYERING SCHEME ON THE NITROGEN OXIDE EMISSION WITH EXHAUST GASES, PPM					
Масса первой обога- щенной зоны, % First enriched zone mass	Масса переходной зоны, % Transition zone mass				
	0	10	20	30	
0	5130	—	—	—	
10	5290	2850	2670	2540	
20	1830	1950	1940	1840	
30	980	1320	1370	1440	

Расчеты определения итоговых концентраций NO в ОГ для других схем расслоения показывают возможность снижения концентрации окиси азота в ходе направленного расслоения заряда (табл. 1). Увеличение массы первоначально сгорающей части заряда с 10 до 30%, независимо от размеров переходной зоны, сокращает концентрацию окиси азота. Влияние массы переходной зоны на выброс NO меняется в зависимости от массы обогащенной зоны. Так, для

схем 1-0...1-3 увеличение переходной зоны уменьшает выброс NO , а для схем 3-0...3-3, напротив, ведет к его росту. При прочих равных условиях уменьшение массы переходной зоны связано с обеднением смеси в каждой порции этой зоны при одновременном небольшом обогащении смеси в последних порциях заряда. Для схем с 10%-ной обогащенной первой порцией заряда обеднение порций переходной зоны в условиях высоких температур увеличивает выбросы окиси азота. При большой массе обогащенной зоны (схемы 3-0...3-3) температура в переходной зоне ниже, и ее обеднение уменьшает выбросы NO . Для разных схем расслоения суммарный выброс окиси азота определяется ее образованием в первых четырех порциях заряда.

Расчеты показывают, что изменение расслоения заряда при работе на нагрузках, близких к полным ($\alpha_{\Sigma}=1,3$), в пределах схем 1-0 и 1-3 снижение концентраций NO может сопровождаться сохранением мощностных (среднего индикаторного давления) и экономических (индикаторного удельного расхода топлива) параметров рабочего цикла (табл. 2).

Изменение параметров газодизеля при резком и плавном расслоении CHANGING THE PARAMETERS OF GAS DIESEL WITH SHARP AND SMOOTH STRATIFICATION			
Схемы расслоения заряда Charge stratification schemes	NO , ppm	Среднее индикаторное давление, МПа Average indicator pressure, MPa	Индикаторный удельный расход топлива, г/кВт·ч Indicator specific fuel consumption, g/kW.h
1-0	980	0,89	195
1-3	1340	0,89	190

Регулирование работы, получаемой в рабочем цикле, возможно двумя путями:

- общим изменением степени обеднения (или обогащения по всем зонам) при сохранении схемы расслоения топлива по зонам;
- обеднением только порций второй половины заряда при неизменном составе смеси обогащенных зон.

Наилучшие результаты снижения NO при уменьшении нагрузки могут быть достигнуты при имитации качественного регулирования мощности по принципу дизеля, то есть для резкого расслоения заряда по схеме 1-0 потребуются сохранение богатой первой зоны воспламенения и обеднение всех последующих сгорающих порций (табл. 3). Однако следует отметить, что в случае работы на средних составах смеси $\alpha_{\Sigma} \leq 1,2$ первая выгорающая порция заряда может

Изменение концентрации окиси азота при обеднении смеси, ppm CHANGE IN NITRIC OXIDE CONCENTRATION DURING MIXTURE DEPLETION, PPM			
Схемы расслоения заряда Charge stratification schemes	Средний коэффициент избытка воздуха по заряду α_{Σ} Average excess air ratio by charge α_{Σ}		
	1,2	1,4	1,6
1-0	3300	700	300
1-3	2500	1200	700

иметь состав смеси $\alpha \approx 1,0$ и вызывать повышенное образование окиси азота.

Несмотря на эффективное подавление образования NO при резком расслоении заряда, реализация подобной схемы 1-0 в реальном двигателе может быть ограничена возможным повышением выбросов продуктов неполного сгорания – окиси углерода CO и углеводородов C_nH_m при работе с частичными нагрузками. Это связано с видом применяемого газообразного топлива, в частности со значениями концентрационных пределов воспламеняемости газозооной смеси, что важно для обедненных смесей последних сгорающих порций заряда.

В реальных условиях нужно учитывать, что от температуры процесса зависит также период задержки воспламенения, изменение которого влияет на показатели эффективности работы двигателя и токсичности. Некоторые исследования учитывают эти коррективы, уточняя модель [14].

Приведенная методика управления процессом сгорания с целью влияния на содержание оксидов азота в ОГ не получила широкого распространения из-за ограниченного количества информации и редко используется в других исследованиях, где применяют иные модели. Несмотря на это, расчетные параметры коррелируются с реальными показателями, полученными в результате экспериментального исследования, и расчетная модель остается актуальной для подобных задач.

Результаты и обсуждение. Рассмотрим фрагмент экспериментальных исследований на двигателе Д-120 (табл. 4). Частота его вращения 2000 мин^{-1} , фиксированная подача доли дизельного топлива – 20% от суммарного поступления дизельного топлива и пропан-бутановой смеси (определенных в приведенном эквиваленте МДж/кг). Коэффициент избытка воздуха газозооной смеси $\alpha_{\text{газ}}$ рассчитан по подаче через впускной трубопровод. Средний по заряду коэффициент избытка воздуха по дизельному топливу и пропан-бутановой смеси $\alpha_{\Sigma} = 1,3$.

Таблица 4

Table 4

КОНЦЕНТРАЦИЯ ТОКСИЧНЫХ КОМПОНЕНТОВ ПРИ СНИЖЕНИИ НАГРУЗКИ В ХОДЕ УМЕНЬШЕНИЯ ПОДАЧИ ГАЗА ВО ВПУСКНОЙ ТРУБОПРОВОД, РРМ
CONCENTRATION OF TOXIC COMPONENTS DURING A DECREASE IN LOAD DURING A DECREASE IN GAS SUPPLY TO THE INLET PIPELINE, RPM

Токсичные компоненты Toxic components	Нагрузка, % от номинальной мощности / Load, % of rated power				
	100	80	60	40	20
$\alpha_{\text{газ}}$	1,8	1,9	2,3	4,5	—
NO_x	1940	1520	1360	1200	800
CO	100	1000	2600	2000	300
C_nH_m	50	1100	3200	4100	500

Испытания выявили ожидаемое сокращение концентрации NO_x в ОГ при снижении нагрузки в ходе уменьшения подачи газа. Аналогичные независимые исследования показывают похожую ситуацию по содержанию токсичных продуктов сгорания [15]. Однако даже при относительно большой доле дизельного топлива уменьшение нагрузки двигателя уже на 20% от номинальной вызывает резкий выброс продуктов неполного сгорания CO и C_nH_m . Их концентрация снижается до приемлемого уровня только при переходе на малые нагрузки, где работа обеспечивается лишь подачей дизельного топлива. Аналогичные характеристики наблюдаются и при использовании других видов топлива, таких как смеси дизельного топлива с добавками рапсового, пальмового и арахисового масел, а также при использовании водотопливных эмульсий [16-19].

Логично полагать, что в целях обеспечения стабильного горения основного заряда – равномерно распределенной по камере сгорания газозвдушной смеси – для сохранения устойчивого воспламенения данных смесей может потребоваться переход к более плавному расслоению заряда или дросселирование воздушного заряда на впуске.

В первом случае обеспечивается легкое регулирование двигателя путем взаимного изменения соотношения подач дизельного и газового топлива: на полной нагрузке подача дизельного топлива минимальна, но при снижении нагрузки в результате уменьшения подачи газа через впускной трубопровод поступление дизельного топлива возрастает. Регулирование простое, но противоречит идее максимального замещения дизельного топлива газообразным. Вместе с тем, это приведет, как показано выше, к усилению интенсивности образования окиси азота в переходной зоне. Современные электронные системы топливоподачи обладают высокой точностью и гибкостью работы [20]. Это открывает дополнительную возможность управления процессом сгорания топлива, в частности образованием оксидов азота.

Улучшение стабильности горения основного газозвдушного заряда возможно при сохранении концентрации газа в рамках концентрационных пределов воспламеняемости. Это может быть обеспечено при дросселировании воздушного заряда на впуске.

Математическая модель позволяет проанализиро-

вать совместное регулирование двигателя, воздействуя на изменение подачи газа, дизельного топлива и дросселирование заряда на впуске P_a . Уровень дросселирования условно может быть задан величиной давления конца процесса впуска. В расчетах величина P_a варьировалась в диапазоне от 0,09 МПа без дросселирования до 0,05 МПа при максимальном дросселировании. Наименьшая величина $P_a = 0,05$ МПа ограничивалась минимально необходимыми температурами воздуха для обеспечения самовоспламенения дизельного топлива.

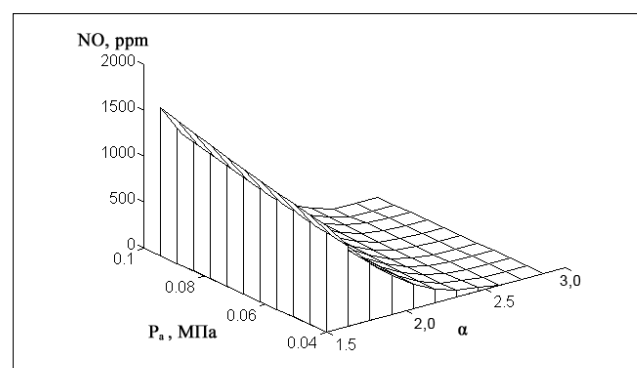


Рис. 3. Влияние давления в цилиндре в конце процесса впуска P_a и состава газозвдушной смеси α на образование NO_x

Fig. 3. Influence of pressure in the cylinder at the end of the intake process P_a and the composition of the gas-air mixture α on the formation of NO_x

Управление дросселированием заряда на впуске позволяет уменьшать концентрацию окиси азота в широком диапазоне рабочих режимов двигателя (рис. 3). Основным механизмом снижения NO_x , по-видимому, следует считать уменьшение массы поступающего заряда, а значит давления в цилиндре и температур горения. Дополнительный эффект от дросселирования заряда – это уменьшение не только концентрации NO_x , но и массовых, суммарных выбросов NO_x с ОГ из-за снижения абсолютного количества воздуха, участвующего в сгорании.

Степень дросселирования выбирают в зависимости от режима работы двигателя. Учитывают условия сохранения составов газозвдушной смеси в камере в пределах воспламеняемости для обеспечения стабильного горения последних порций заряда, поддерживающих приемлемый уровень выбросов окиси

Таблица 5
Table 5
КОНЦЕНТРАЦИЯ ОКИСИ АЗОТА ПРИ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ОТРАБОТАННЫХ ГАЗОВ (СХЕМА 1-3)
NITRIC OXIDE CONCENTRATION DURING EXHAUST GAS RECIRCULATION (SCHEME 1-3)

Остаточные и рециркулируемые газы, % Residual and recirculated gases	NO, ppm	Снижение NO, % NO decrease	Роль порций в снижении NO, % Portions role in reducing NO	
			1-5	6-10
5	2500	—	—	—
10	1900	24	82	18
15	1100	56	84	16

углерода и углеводородов, которые, по условиям Евро 6, должны быть снижены вместе с оксидами азота.

Степень дросселирования зависит от типа газа. По результатам экспериментальных исследований, не затронутых в этой статье, при работе на пропан-бутановых смесях в ходе снижения нагрузки от 100 до 60% целесообразно постепенное увеличение дросселирования и уменьшение коэффициента наполнения цилиндра на 0-20% (P_a варьируется от 0,09 до 0,07 МПа). Это обеспечивает поддержание коэффициента избытка газозоудной смеси на уровне $\alpha_{газ} = 1,8-2,0$. Дальнейшее снижение нагрузки требует только качественного регулирования путем обеднения газозоудно-го заряда. Это позволяет сохранить концентрацию окиси углерода на уровне 400-600 ppm, а углеводородов – 200-700 ppm. Дальнейшее снижение CO и C_nH_m возможно при смене газа на метан или установке нейтрализатора.

При работе на высоких нагрузках с обогащением заряда до коэффициента избытка воздуха $\alpha_2 = 1,2-1,3$ и $\alpha_{газ} = 1,8-2,0$ по газозоудной смеси концентрация NO_x может быть дополнительно снижена в ходе рециркуляции ОГ.

Настоящая модель позволяет провести параметрический анализ. Введение в заряд рециркулируемых газов имитируется повышением коэффициента остаточных газов γ_r по порциям заряда. Допускается, что рециркуляция ОГ осуществляется через впускной трубопровод, равномерно вместе с подачей газозоудной смеси. Концентрация продуктов сгорания полагается одинаковой во всех порциях заряда. Рассмотрим результаты расчетов для схемы расслоения 1-3 и трех уровней γ_r : 5, 10 и 15% (табл. 5). Уровень 5% соответствует исходной концентрации остаточных газов в заряде, а уровни 10 и 15% отражают введение рециркуляции ОГ. Процесс сопровождается эффективным снижением образования концентрации окиси азота в результате уменьшения концентрации свободного кислорода и понижения температур сгорания [21].

Неоднородность поля температур, имеющая место в поршневом двигателе, в данном случае усиливается непостоянством состава смеси. Вследствие этого вклад отдельных порций заряда в итоговое снижение NO различен. Наиболее сильно действуют рециркулируемые газы, попадающие в переходную зону

первой половины заряда. При равномерной подаче 10 и 15% рециркулируемых газов общее снижение выбросов NO с ОГ составляет соответственно 24 и 56%. Причем основной эффект снижения – 82-84% – достигается с ходе уменьшения интенсивности образования NO в первой половине заряда (порции 1-5). Этот процесс отмечается и во второй половине заряда (порции 6-10), однако вследствие низких исходных значений их роль в общем уменьшении окиси азота составляет 16-18%.

Образование токсичных продуктов NO_x и CO при рециркуляции газовых потоков рассматривалось и другими исследователями при условии использования других принципов построения модели [22]. Тенденция изменения содержания оксидов азота от аналогичных факторов коррелируется с результатами текущего исследования, что доказывает достоверность работы расчетной модели.

Выводы

1. Расчетная модель образования окиси азота с учетом расслоения заряда показывает высокую эффективность проведения параметрического анализа для прогнозирования показателей выбросов NO проектируемых двигателей с расслоенным зарядом, например работающих по газодизельному циклу.

2. Снижение концентрации окиси азота в ОГ на 40-50% достигается при различных схемах расслоения заряда в камере сгорания. Наиболее эффективно разделение заряда на малую по массе обогащенную первую порцию и основной обедненный заряд.

3. При снижении нагрузки возможно неполное сгорание газа в последних порциях заряда из-за его переобеднения. Обеспечение норм по CO, CH и NO потребует смешанного регулирования двигателя

4. Рециркуляция 15% ОГ позволяет снизить выброс NO еще почти на 50%.



БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нагорнов С.А., Мещерякова Ю.В., Мещеряков А.Г. Экспериментальное исследование работы дизельного двигателя на смесевом топливе // *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2016. №1. С. 9-11.
2. Давыдова С.А., Старостин И.А. Класс экологичности современных сельскохозяйственных тракторов // *АгроЭкоИнфо*. 2020. №2(40). С. 19.
3. Кульчицкий А.Р. Токсичность автомобильных и тракторных двигателей. Владимир: Владимирский государственный университет. 2000. 256 с.
4. Сайкин А.М. Нормативные проблемы при разработке средств экологической и активной безопасности автотранспортных средств в отношении воздушной среды // *Автомобили, двигатели и их компоненты*. 2008. Вып. 239. С. 181-188.
5. Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Каменецкий Д.А. Окисление азота при горении. М.-Л.: АН СССР. 1947. 145 с.
6. Воинов А.Н. Сгорание в быстроходных поршневых двигателях. М.: Машиностроение. 1977. 276 с.
7. Бижаев А.В., Девянин С.Н. Результаты экспериментальных исследований добавок воды в камеру сгорания дизельного двигателя // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2016. Т. 10. №2. С. 36-39.
8. Fenimore C.P. Formation of nitric oxide from fuel nitrogen in ethylene flames. *Combustion and flame*. 1972. Vol. 19. 289-296.
9. Шайкин А.П., Галиев И.Р. Особенности горения метано-водородных смесей в поршневых энергоустановках и двигателях // *Безопасность труда в промышленности*. 2020. №1. С. 21-25.
10. Иванов В.В., Кузьмина О.В. Моделирование образования окиси азота по в кинетических механизмах Я.Б. Зельдовича // *Труды Поволжского государственного технологического университета. Серия: Технологическая*. 2017. №5. С. 235-239.
11. Лопатин О.П. Зонная модель процесса образования оксидов азота в цилиндре газодизеля // *Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения*. 2015. №4(17). С. 36-39.
12. Максимов А.Л. Расчетная модель действительного цикла двигателя внутреннего сгорания // *Труды Московского автомобильно-дорожного института*. 1976. С. 74-81.
13. Бижаев А.В., Чумаков В.Л., Путан А.А. Расчетная модель основных параметров рабочего цикла дизеля с использованием различных типов топлив // *Доклады ТСХА*. 2020. Вып. 292. С. 244-247.
14. Ощепков П.П., Бижаев А.В., Заев И.А., Смирнов С.В., Адегбенро С.А. Исследование дизельного топлива с добавками пальмового масла // *Транспорт на альтернативном топливе*. 2018. №5(65). С. 56-62.
15. Герцык С.И., Беляков И.В. Оценка содержания оксидов азота в продуктах горения газообразных топлив // *Электротехнология*. 2020. №4. С. 34-40.
16. Бижаев А.В., Девянин С.Н., Соо С., Фомин В.М., Ибрагим А.С.Х., Ходяков А.А. Использование арахисового масла в качестве присадки к дизельному топливу // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. №6. С. 45-50.
17. Devyanin S.N., Bigaev A.V., Markov V.A. Influence of Method of Adding Water to Combustible Mixture on Diesel Engine Performance. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018. 327. 022024.
18. Плотников С.А., Кантор П.Я., Козлов И.С., Втюрина М.Н. Оценка экологических свойств рапсовых масел для применения в качестве моторного топлива сельскохозяйственного трактора // *Инженерные технологии и системы*. 2020. Т. 30. №1. С. 43-59.
19. Бижаев А.В., Симеон А.А. Применение пальмового масла в качестве присадки к топливу тракторных дизельных двигателей // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. №6. С. 41-46.
20. Чумаков В.Л., Бижаев А.В. Снижение выбросов оксидов азота с отработавшими газами газодизеля // *Чтения академика В.Н. Болтинского*. 2019. С. 118-122.
21. Дунин А.Ю., Шатров М.Г., Голубков Л.Н., Яковенко А.Л. Организация ступенчатой характеристики впрыскивания топлива управлением электрическим импульсом, поступающим на электромагнит форсунки аккумуляторной топливной системы // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2020. №1(718). С. 32-42.
22. Халид Эль-Шейх, Рябов Г.А., Хамид М.Д., Бухаркина Т.В., Хусейн М.А. Образование и подавление выбросов NO_x и N₂O при сжигании топлив в среде кислорода с рециркуляцией CO₂ (обзор) // *Теплоэнергетика*. 2020. №1. С. 5-14.

REFERENCES

1. Nagornov S.A., Meshcheryakova Yu.V., Meshcheryakov A.G. Eksperimental'noe issledovanie raboty dizel'nogo dvigatelya na smesevom toplive [Experimental study of the operation of a diesel engine running on mixed fuel]. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2016. №1. 9-11 (In Russian).
2. Davydova S.A., Starostin I.A. Klass ekologichnosti sovremennykh sel'skokhozyaistvennykh traktorov [Environmental class of modern agricultural tractors]. *AgroEkoInfo*. 2020. №2(40). 19 (In Russian).
3. Kul'chitskiy A.R. Toksichnost' avtomobil'nykh i traktornykh dvigateley [Toxicity of automobile and tractor engines]. Vladimir: Vladimirsii gosudarstvennyi universitet. 2000. 256 (In Russian).
4. Saikin A.M. Normativnye problemy pri razrabotke sredstv ekologicheskoy i aktivnoy bezopasnosti avtotransportnykh sredstv v otnoshenii vozduшной среды [Regulatory problems in the development of means of ecological and active safety of vehicles in relation to the air environment]. *Avtomobili, dvigateli i*

ikh komponenty. 2008. Iss. 239. 181-188 (In Russian).

5. Zel'dovich Ya.B., Sadovnikov P.Ya., Frank-Kamenetskiy D.A. Okislenie azota pri goreнии [Oxidation of nitrogen during combustion]. M.-L.: AN SSSR. 1947. 145 (In Russian).

6. Voinov A.N. Sgoranie v bystrokhodnykh porshnevnykh dvigatelyakh [Combustion in high-speed piston engines]. M.: Mashinostroenie. 1977. 276 (In Russian).

7. Bizhaev A.V., Devyanin S.N. Rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy dobavok vody v kameru sgoraniya dizel'nogo dvigatelya [Results of experimental studies of water additives in the combustion chamber of a diesel engine]. *Sel'skokhozyaistvennyye mashiny i tekhnologii*. 2016. Vol. 10. N2. 36-39 (In Russian).

8. Fenimore C.P. Formation of nitric oxide from fuel nitrogen in ethylene flames. Combustion and flame. 1972. Vol. 19. 289-296.

9. Shaykin A.P., Galiev I.R. Osobennosti goreniya metano-vodorodnykh smesey v porshnevnykh energoustanovkakh i dvigatelyakh [Features of combustion of methane-hydrogen mixtures in piston power plants and engines]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2020. N1. 21-25 (In Russian).

10. Ivanov V.V., Kuz'mina O.V. Modelirovanie obrazovaniya okisi azota NO v kineticheskikh mekhanizмах Ya.B. Zel'dovicha [Modeling the formation of nitric oxide NO in kinetic mechanisms of Ya.B. Zeldovich]. *Trudy Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnologicheskaya*. 2017. N5. 235-239 (In Russian).

11. Lopatin O.P. Zonnaya model' protsessa obrazovaniya oksidov azota v tsilindre gazodizelya [Zone model of the formation of nitrogen oxides in a gas diesel cylinder]. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy i puti ikh resheniya*. 2015. N4(17). 36-39 (In Russian).

12. Maksimov A.L. Raschetnaya model' deistvitel'nogo tsikla dvigatelya vnutrennego sgoraniya [Calculation model of the actual cycle of an internal combustion engine]. *Trudy Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo instituta*. 1976. 74-81 (In Russian).

13. Bizhaev A.V., Chumakov V.L., Putan A.A. Raschetnaya model' osnovnykh parametrov rabocheho tsikla dizelya s ispol'zovaniem razlichnykh tipov topliv [Calculation model of the main parameters of the diesel engine operating cycle using different types of fuels]. *Doklady TSKhA*. 2020. Iss. 292. 244-247 (In Russian).

14. Oshchepkov P.P., Bizhaev A.V., Zaev I.A., Smirnov S.V., Adebenro S.A. Issledovanie dizel'nogo topliva s dobavkami pal'movogo masla [Research of diesel fuel with palm oil addi-

tives]. *Transport na al'ternativnom toplive*. 2018. N5(65). 56-62 (In Russian).

15. Gertsyk S.I., Belyakov I.V. Otsenka sodержaniya oksidov azota v produktakh goreniya gazoobraznykh topliv [Estimation of the content of nitrogen oxides in combustion products of gaseous fuels]. *Elektrometallurgiya*. 2020. N4. 34-40 (In Russian).

16. Bizhaev A.V., Devyanin S.N., Soo S., Fomin V.M., Ibragim A.S.Kh., Khodyakov A.A. Ispol'zovanie arakhisovogo masla v kachestve prisadki k dizel'nomu toplivu [The use of peanut oil as an additive to diesel fuel]. *Sel'skokhozyaistvennyye mashiny i tekhnologii*. 2018. Vol. 12. N6. 45-50 (In Russian).

17. Devyanin S.N., Bigaev A.V., Markov V.A. Influence of Method of Adding Water to Combustible Mixture on Diesel Engine Performance. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018. 327. 022024 (In English).

18. Plotnikov S.A., Kantor P.Ya., Kozlov I.S., Vtyurina M.N. Otsenka ekologicheskikh svoystv rapsovykh masel dlya primeneniya v kachestve motornogo topliva sel'skokhozyaistvennogo traktora [Assessment of the ecological properties of rapeseed oils for use as a motor fuel for an agricultural tractor]. *Inzhenernye tekhnologii i sistemy*. 2020. Vol. 30. N1. 43-59 (In Russian).

19. Bizhaev A.V., Simeon A.A. Primenenie pal'movogo masla v kachestve prisadki k toplivu traktornykh dizel'nykh dvigatelyey [Palm oil use as additive to fuel for tractor diesels]. *Sel'skokhozyaistvennyye mashiny i tekhnologii*. 2017. N6. 41-46 (In Russian).

20. Chumakov V.L., Bizhaev A.V. Snizhenie vybrosov oksidov azota s otrabotavshimi gazami gazodizelya [Reducing emissions of nitrogen oxides with exhaust gases of gas diesel]. *Chteniya akademika V.N. Boltinskogo*. 2019. 118-122 (In Russian).

21. Dunin A.Yu., Shatrov M.G., Golubkov L.N., Yakovenko A.L. Organizatsiya stupenchatoy kharakteristiki vpryskivaniya topliva upravleniem elektricheskimi impul'sami, postupayushchimi na elektromagnit forsunki akkumulyatornoy toplivnoy sistemy [Organization of the stepwise characteristics of fuel injection by controlling the electric impulse entering the electromagnet of the nozzle of the accumulator fuel system]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie*. 2020. N1(718). 32-42 (In Russian).

22. Khalid El'-Sheikh, Ryabov G.A., Khamid M.D., Bukharkina T.V., Khusein M.A. Obrazovanie i podavlenie vybrosov NO_x i N₂O pri szhiganiy topliv v srede kisloroda s retsirkulyatsiey CO₂ (obzor) [Formation and suppression of NO_x and N₂O emissions during combustion of fuels in oxygen with CO₂ recirculation (review)]. *Teploenergetika*. 2020. N1. 5-14 (In Russian).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

**Статья поступила в редакцию 11.10.2020
The paper was submitted
to the Editorial Office on 11.10.2020**

**Статья принята к публикации 15.01.2021
The paper was accepted
for publication on 15.01.2021**